

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, М. В. САЛТАВЕЦЬ, Д. С. ВОРОБІЙОВ**МЕТОДИКА РІШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ**

Встановлено, що для рішення зворотних задач теплопровідності найбільш придатним є екстремальний метод підбора (проб), який дозволяє використовувати сучасну обчислювальну техніку, за рахунок чого час і вартість рішення мінімальні, а точність – достатня для інженерних розрахунків. Визначено склад обладнання і створено обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень процесів нагріву полоси в печі, процесів теплообміну полоси і інструменту в зоні деформації при прокатці, а також процесу примусового охолодження полоси в технологічному циклі. В склад комплексу входять персональний комп'ютер та самостійно розроблений сітковий процесор, підсилювач аналогового сигналу, аналогово-цифровий перетворювач і пакет програм для забезпечення роботи комплексу.

Ключові слова: тонкий лист, гаряча прокатка, методика експериментальних досліджень, теплопровідність, зворотні задачі, коефіцієнти теплообміну, коефіцієнти тепловіддачі, аналогово-цифровий обчислювальний комплекс, R–R сітковий процесор.

О. И. ТРИШЕВСКИЙ, Н. В. САЛТАВЕЦ, Д. С. ВОРОБЬЁВ**МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВодНОСТИ**

Установлено, что для решения обратных задач теплопроводности наиболее подходящим является экстремальный метод подбора (проб), который позволяет использовать современную вычислительную технику, за счет чего время и стоимость решения минимальны, а точность – достаточна для инженерных расчетов. Определен состав оборудования и создан вычислительный комплекс для обработки результатов экспериментальных исследований процессов нагрева полосы в печи, процессов теплообмена полосы и инструмента в зоне деформации при прокатке, а также процесса принудительного охлаждения полосы в технологическом цикле. В состав комплекса входят персональный компьютер и самостоятельно разработанный R–R сеточный процессор, усилитель аналогового сигнала, аналогово-цифровой преобразователь и пакет программ для обеспечения работы комплекса.

Ключевые слова: тонкий лист, горячая прокатка, методика экспериментальных исследований, теплопроводность, обратные задачи, коэффициенты теплообмена, коэффициенты теплоотдачи, аналогово-цифровой вычислительный комплекс, R-R сеточный процессор.

О. I. TRISHEVSKY, N. V. SALTAVETS, D. S. VOROBYEV**TECHNIQUE OF SOLUTION OF REVERSE TASKS OF HEAT CONDUCTION**

It has been established that for solving inverse heat conduction problems the most suitable is the extreme method of selection (samples), which allows using modern computing equipment, due to which the time and cost of the solution are minimal, and accuracy is sufficient for engineering calculations. The composition of the equipment has been determined and a computing complex has been created for processing the results of experimental studies of strip heating in a furnace, strip heat exchange and tool processes in the deformation zone during rolling, as well as the process of forced cooling of the strip in the technological cycle. The complex includes a personal computer and an independently developed R – R grid processor, an analog signal amplifier, an analog-to-digital converter and a software package for the operation of the complex. The value of the heat transfer coefficient, which is determined from the solution on the R-R – network processor, by an implicit finite negative method, is substituted for the control solution of the direct problem on the PC by an explicit finite-negative method. If the values of the model temperature coincide with the experimental one, the solution is recognized as correct and is entered into the database. If the error exceeds the allowable, the solution must be repeated.

Key words: thin sheet, hot rolling, experimental research, thermal conductivity, inverse problems, heat transfer coefficients, heat transfer coefficients, analog-digital computing complex, R-R grid processor.

Вступ. Аналіз технічного стану обладнання заводів України і технологій виготовлення полоси на цих заводах і порівняння існуючого обладнання з обладнанням і технологіями сучасного виробництва гарячої полоси за кордоном показали що:

У промислово розвинених країнах (Німеччина, Японія, Франція, Канада, США, Італія, Південна Корея) проводяться дослідження технології прокатного виробництва гарячекатаної полоси з метою скорочення витрат на виробництво тони прокату (економія палива, електроенергії, металу) за рахунок скорочення часу технологічного процесу. Для досягнення цієї мети, на основі математичного моделювання технологічного процесу з уточненням окремих положень під час натурних експериментів, створено ливарно-прокатні агрегати.

Але, наведена в технічній літературі інформація, щодо досягнень в розробці нових технологій, має рекламний характер, або такий, що вводить в оману і не може бути використана для розробки обладнання і технології.

На Україні обладнання і технологія прокатки полоси були створені відповідно до вимог часу їх

побудови, із застосуванням злитків великих розмірів при мінімумі обладнання. Така технологія потребує неодноразового нагріву прокату і внаслідок цього визначається великими витратами енергії на виробництво тони прокату.

Технології прокатки полоси на Україні потребують докорінних змін з урахуванням вимог економії енергії для зменшення собівартості готової продукції шляхом удосконалення обладнання і режимів обтіснень з урахуванням теплового стану полоси.

Актуальність виконаних досліджень. Вимоги сучасного ринку листопрокатної продукції диктують необхідність підвищення конкурентоспроможності виробленого листа за рахунок зниження його собівартості без втрати якості. Зокрема, це спонукає металургів шукати нові технологічні схеми прокатки тонкого гарячекатаного листа, який за якістю і рівнем властивостей не поступається або наближається до гарячекатаного. Так, відносно недавно з'явився новий технологічний процес прокатки, сутність якого полягає у використанні системи прискореного охолодження полоси між чорною та чистою

групами клітей листопрокатного стану, а також прискореного охолодження полоси за чистовою групою з метою отримання гарячекатаної полоси товщиною до 0,7 мм. Але, на жаль, до цього часу не вирішеною залишається проблема охолодження полоси і валків при мінімумі розходу енергії, що дозволило би більш ефективно використовувати існуюче обладнання для здійснення нового технологічного процесу.

Для підготовки практичних рекомендацій щодо удосконалення технології необхідно розробити математичні моделі теплового стану полоси від входу в чорнову групу клітей до змотування готової полоси у рулон та провести відповідні експериментальні дослідження.

В даний час, практично у всіх областях техніки, моделювання є обов'язковим елементом у процесі створення, іспитів і впровадження нових об'єктів техніки. Моделювання, як метод дослідження, застосовується на етапі різних видів натурних іспитів, що визначають характеристики об'єктів.

Тому завдання, пов'язані з удосконаленням технологічних процесів прокатки тонколистової сталі, зокрема, раціонального охолодження смуги і валків при мінімальному витрачанні енергії з метою зниження собівартості є важливими і актуальними.

Мета роботи. Враховуючи значну трудомісткість та вартість експериментальних досліджень процесів гарячої прокатки тонкого листа, необхідно попередньо розробити найбільш раціональну методику виконання експериментальних досліджень цього складного процесу, яка дозволяла би отримувати необхідні результати з найменшими витратами. Тому **метою виконаних досліджень** є розробка раціональної методики виконання експериментальних досліджень гарячої прокатки тонкого листа з визначенням коефіцієнтів теплообміну між металом і валками, а також коефіцієнтів тепловіддачі до води для використання отриманих значень в граничних умовах математичної моделі при розрахунку систем керування тепловим станом полоси і валків.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та вирішені наступні задачі.

- Вибраний метод рішення зовнішньої зворотної задачі теплопровідності.
- Вибраний метод рішення внутрішньої (інверсної) зворотної задачі теплопровідності.
- Вибрані обчислювальні засоби для рішення зворотних задач.

Основні результати досліджень.

Метод рішення зворотних задач теплопровідності.

Зовнішня зворотна задача теплопровідності може бути вирішена (тобто знайдено коефіцієнт тепловіддачі, якщо ми будемо мати експериментальні данні про температуру середовища і температуру поверхні полоси або валків [1, 2].

Інверсні (або внутрішні зворотні) задачі – це такі задачі, у яких визначаються коефіцієнти усередині основного рівняння (значення коефіцієнтів

теплопровідності, питомої теплоємності та питомої ваги).

Відомо, що найбільш ефективними, з існуючих на сьогодні методів рішення зворотних задач, є екстремальні методи. При виборі оптимального методу рішення основними критеріями є точність, час і вартість рішення, можливість використання обчислювальної техніки. З цього погляду найбільш придатним є метод підбора (проб) [3].

Сутністю його є підстановка у рівняння теплопровідності найбільш вірогідного значення коефіцієнта тепловіддачі. Отримане значення теоретичної температури порівнюється з температурою зафіксованою під час експерименту. Оцінюється розбіжність експериментальної і теоретичної температури. У разі перевищення допустимої похибки, ітераційним шляхом підбирається значення коефіцієнта тепловіддачі при якому похибка є мінімальною.

При використанні R-R – сіткового процесора процес рішення спрощується. Оператор встановлює збіг значень теоретичної і експериментальної температур шляхом регулювання опору, що моделює значення коефіцієнта тепловіддачі. Після чого обчислює значення коефіцієнту тепловіддачі по визначеному значенню опору. Застосування R-R – сіткового процесора дозволяє прискорити обробку результатів експериментальних досліджень.

Істотним є вибір розмірності розв'язуваної задачі. При рішенні двох – і особливо тривимірних задач виникають складності, пов'язані з великою кількістю вузлів сітки, що задіяні в обчислюваному процесі. При переході від двовірної до одновірної задачі кількість вузлів сітки зменшується на порядок.

Висока вартість проведення експериментальних досліджень, методом фізичного моделювання, на зменшених копіях технологічного обладнання (лабораторних прокатних станах) і неможливість забезпечити на них реальних температурно-швидкісних режимів прокатки потребують розробки методів математичного моделювання технологічного процесу.

Перехід до одновірної моделі при обробці результатів експериментальних досліджень (при рішенні зворотної задачі теплопровідності) може привести до помилки в результатах обчислень, яка перевищуватиме припустиму в інженерних обчисленнях похибку. Це пов'язано з тим, що одновірна модель не враховує впливу сусідніх вузлів на тепловий стан експериментального вимірювального блоку. Можливість використання одновірної або двовірної моделі можна оцінити шляхом розв'язання прямої задачі на стадії підготовки вихідних даних для проектування вимірювального блоку.

Вибір типу обчислювальних засобів для обробки результатів експериментальних досліджень.

У якості обчислювальних засобів можуть бути використані: аналогові, цифрові або гібридні обчислювальні машини, до складу яких входить сітковий процесор і цифрова обчислювальна машина

для розрахунку значень опорів у вузлах R–R сітки. Подібний підхід застосовується при польотних іспитах аерокосмічної техніки [4]. Це обумовлено тим, що при проектуванні і випробуваннях аерокосмічної техніки використовують найдосконаліші методи і засоби досліджень, які дозволяють суттєво зменшити кількість (і вартість) експериментів.

Оскільки для рішення зворотної задачі використовується метод підбора (проб), на цифровій обчислювальній машині необхідно виконати 10-15 розрахунків з метою мінімізації відхилення експериментальних і модельних температур. На сітковому процесорі аналогової обчислювальної машини цю операцію можна виконати практично миттєво. При обчисленні на цифровій обчислювальній машині оператор вручну задає граничні умови, ґрунтуючись на візуальному контролі різниці експериментальної і модельної температур.

Неявний кінцево-від'ємний метод передбачає виконання обчислень за допомогою R–R сіткового процесора.

Поле опорів R–R сітки розбивається на вузли. Граничні та початкові умови задають за допомогою блоків завдання граничних та початкових умов, відповідно. В процесі рішення, підбираючи опір на еталонному блоці, задля збігу модельної та експериментальної температури, отримуємо значення опору для блоку граничних умов.

При виконанні обчислень явним кінцево-від'ємним методом, з використанням персонального комп'ютера, потрібне програмне забезпечення, розроблене на основі математичної моделі явища. Підставляючи вручну (з клавіатури) коефіцієнти, відповідні до початкових та граничних умов наведеної задачі, у процесі рішення, отримуємо значення модельної температури. Ця температура порівнюється з температурою отриманою експериментальним шляхом.

У разі розбіжності модельної і експериментальної температури проводиться підбір коефіцієнта, що відповідає граничним умовам до тих пір, доки розбіжність між модельними і експериментальними температурами не буде мінімальною. Швидкість рішення залежить від кваліфікації оператора, як користувача ПЕОМ, та як спеціаліста у області досліджуваних процесів.

Швидкість рішення забезпечується:

- параметрами комп'ютера;
- мовою програмування, що застосовується;
- оптимальністю побудови програмного забезпечення;
- кваліфікацією оператора.

У випадку використання сіткового процесора процес мінімізації відхилення між експериментальною і модельною температурою залежить – тільки від психофізичних якостей оператора:

- швидкості зчитування інформації;
- швидкості її осмислювання;
- швидкості ухвалення рішення про зміну вихідних даних;

– швидкості зміни вихідних даних.

Істотним є також частота оновлення результатів рішення на екрані монітору.

Якою би великою не була швидкість рішення задачі на комп'ютері, швидкість рішення задачі на сітковому процесорі вища, бо дорівнює швидкості світла [5]. Крім того, швидкість зміни вихідних даних у сітковому процесорі на порядок вища швидкості їхньої зміни у випадку ручного завдання з клавіатури.

За допомогою сучасних мов програмування можливо здійснити обчислення варіантів по критерію мінімізації відхилення між експериментальною і модельною температурою. Однак, створення програмного забезпечення для подібних розрахунків представляє окрему самостійну задачу і значно ускладнює процес обробки результатів експериментальних досліджень [6].

Таким чином, для обробки результатів експериментальних досліджень необхідно створити обчислювальний комплекс, який повинен складатися з сіткового процесора з R–R сіткою і персонального комп'ютера. Аналогово-обчислювальна машина (АОМ) включає блоки: завдання початкових і граничних умов, реєстрації і процесор з R–R сіткою. При рішенні зворотних задач доцільно використовувати сітковий процесор з R–R сіткою, з подальшим контролем отриманих значень шляхом рішення прямої задачі за допомогою цифрової обчислювальної машини. Для отримання достовірних результатів, дослідження слід виконати двома методами:

– неявним кінцево-від'ємним методом при виконанні обчислень за допомогою R–R сіткового процесора;

– явним кінцево-від'ємним методом при виконанні обчислень з використанням персонального комп'ютера.

Відомо, що фактичні значення теплофізичних характеристик матеріалу зразка, який використовується у дослідженнях, можуть суттєво відрізнятися від наведених у довідковій літературі.

Тому для визначення і урахування дійсних теплофізичних характеристик матеріалу, дослідження необхідно виконувати у такій послідовності:

– рішення внутрішньої (інверсної) зворотної задачі теплопровідності з метою уточнення значень теплофізичних характеристик матеріалу, з якого виготовлено вимірювальний блок;

– рішення зовнішньої зворотної задачі теплопровідності з метою визначення коефіцієнтів тепловіддачі від гарячої полоси до води, що його охолоджує в залежності від параметрів кінцевих пристроїв системи охолодження.

При цьому необхідно враховувати:

- тип пристрою по характеру подачі води (розпилена чи суцільна середа);
- кут нахилу вісі пристрою по відношенню до поверхні, що охолоджується;
- довжину ефективної зони дії струменю води;
- кількість води і тиск.

Обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень

Для скорочення часу обробки результатів експериментальних досліджень і підвищення точності їх виконання створено аналогово-цифровий обчислювальний комплекс. Оскільки подібні комплекси мають спеціальне призначення їх практично нема у загальному користуванні. Тому науковцям необхідно самостійно проектувати і створювати подібні комплекси.

Враховуючи складність та особливості процесів, то досліджуються, R–R –сітковий процесор було доповнено спеціально розробленими вузлами, а саме: R–R – сітковим процесором для рішення двомірних задач з блоком розширення початкових і граничних умов. Внаслідок цього, з'явилась можливість вирішувати двомірні задачі теплопровідності. Загальний вигляд обчислювального комплексу приведено на рис. 1.

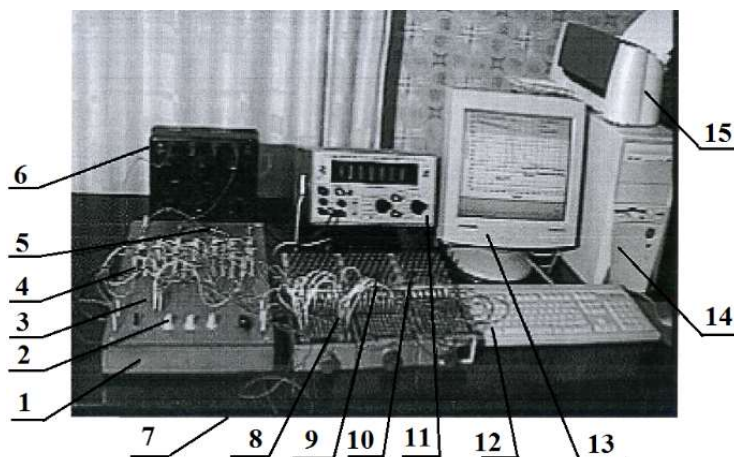


Рис. 1 – Загальний вигляд обчислювального комплексу

1 – блок стабілізатора напруги живлення; 2 – блок завдання граничних умов; 3 – блок завдання початкових умов; 4 – блок опорів; 5 – перемикачі часу рішення задачі; 6 – блок еталонних опорів; 7 – R–R – сітковий процесор; 8 – блок для розширення початкових і граничних умов; 9 – блок опорів для настройки часу рішення; 10 – блок опорів для моделювання двомірних задач; 11 – універсальний вольтметр; 12 – клавіатура; 13 – монітор; 14 – системний блок; 15 – пристрій для запису інформації на компакт-диски

В основному блоці АОМ 1 реконструйовано блок стабілізатора напруги живлення з урахуванням вимог часу – стабілізація при коливанні напруги в мережі від 140 до 280 вольт.

Блок 2 завдання граничних умов використовується для моделювання процесів нагріву і охолодження.

Блок 3 завдання початкових умов виконаний у вигляді розподільвача з двомастами опорами. Це дозволяє задавати початкові умови з точністю 0,5 %, що відповідає вимогам до проектування блоків завдання початкових умов обчислювальних машин [7].

Час процесу та теплофізичні характеристики матеріалу, при рішенні задач методом Лібманна (дискретний простір – дискретний час) враховуються за допомогою блоку опорів 4 [6, 7, 8].

Для зменшення кількості завдань початкових умов використано три сітки, до вузлових точок яких підключаються опори, що враховують час рішення і теплофізичні характеристики матеріалу (питому вагу і теплоємність).

Перемикачі часу рішення задачі 5 дозволяють вмикати одну з трьох сіток, щоб швидко змінювати час вирішення задачі, який становить для положення I – 0,125, для II – 0,5 від часу рішення обчисленого для III положення.

Блок 6 еталонних опорів дозволяє завдяки цифрам на лімбах швидко визначити значення опору, який входить до формули для обчислення коефіцієнту тепловіддачі.

R–R – сітковий процесор 7 створений додатково до основного блоку для рішення двомірних задач. Він має в своєму складі блок 8 для розширення початкових і граничних умов, а також блок опорів для настройки часу рішення 9.

Основою R–R – сіткового процесора є блок опорів 10 для моделювання двомірних задач, а також рішення задач теплообміну між декількома об'єктами.

Універсальний вольтметр 11 використовується для настройки опорів між вузлами R–R – сіткового процесора та настройки опорів в блоці встановлення часу рішення. Реєстрація результатів відбувається в персональному комп'ютері який зв'язаний з R–R сітковим процесором за допомогою аналогово-цифрового перетворювача.

Клавіатура 12 використовується для завдання вихідних даних при рішенні прямих і зворотних задач, а також керування цифровою частиною обчислювального комплексу.

Монітор 13 використовується при створенні програмного забезпечення, візуалізації рішення прямих і зворотних задач.

Системний блок 14 дозволяє вирішувати прямі задачі за допомогою цифрового процесора і має пристрій для запису інформації на компакт-диски 15.

При виконанні обчислень явним кінцево-від'ємним методом, з використанням персонального комп'ютера, потрібне програмне забезпечення, розроблене на основі математичної моделі явища. Підставляючи вручну (з клавіатури) коефіцієнти, відповідні до початкових та граничних умов наведеної задачі, у процесі рішення на ПЕОМ, отримуємо значення температури при заданих коефіцієнтах теплообміну. Ця температура (модельна) порівнюється з експериментальною. У разі розбіжності модельної і експериментальної температури проводимо підбір коефіцієнту теплообміну до тих пір, доки розбіжність між модельними і експериментальними температурами не буде мінімальною. Швидкість рішення залежить від кваліфікації оператора, як користувача ПЕОМ, і як спеціаліста у області досліджуваних процесів.

Для спрощення обробки результатів експериментальних досліджень створено обчислювальний комплекс.

Спочатку рішення виконується, практично за один прийом, на R–R сітковому процесорі. Встановлюється значення в вольтах (аналог експериментальної температури) на табло універсального вольтметра шляхом регулювання опору, що моделює значення коефіцієнту тепловіддачі. Значення коефіцієнту тепловіддачі обчислюється по визначеному значенню опору, що моделює коефіцієнт тепловіддачі.

Значення коефіцієнту тепловіддачі визначені з рішення на R–R – сітковому процесорі, неявним кінцево-від'ємним методом, підставляються для контрольного рішення прямої задачі на ПЕОМ явним кінцево-від'ємним методом. У разі збігу значень модельної температури з експериментальною – рішення визнається вірним і заноситься в базу даних. У разі, якщо похибка перевищує припустиму, рішення необхідно повторити.

Таким чином, завдяки створеному обчислювальному комплексу маємо змогу вирішити задачу двома методами: аналоговим (з використанням неявного кінцево-від'ємного методу) і чисельним (з використанням явного кінцево-від'ємного методу), що достатньо для отримання достовірних результатів.

Висновки

1. Встановлено, що для рішення зворотних задач теплопровідності найбільш придатним є екстремальний метод підбора (проб), який дозволяє використовувати сучасну обчислювальну техніку, за рахунок чого час і вартість рішення мінімальні, а точність – достатня для інженерних розрахунків.

2. Визначено склад обладнання і створено обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень процесів нагріву полоси в печі, процесів теплообміну полоси і інструменту в зоні деформації при прокатці, а також процесу примусового охолодження полоси в технологічному циклі. В склад комплексу входять персональний комп'ютер та самостійно розроблений сітковий процесор, підсилювач аналогового сигналу, аналогово-цифровий перетворювач і пакет програм для забезпечення роботи комплексу.

Список літератури

1. Салтавец В.И., Николаенко В.Е. Методика решения обратной задачи теплопроводности / ВНИИС Госстроя СССР №3570-83 // Реф. журнал ВНИИС. Серия 01. – вып. 3 – 1983.
2. Спэрроу К. Характеристики полых стеклянных шариков микроскопических размеров, материала и непрозрачной добавки к другим теплоизоляциям // Теплопередача. – 1976. – №2. – С. 91–99.
3. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.
4. Натурный эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований / А.Н. Солодихин, В.А. Солодовников и др.; под ред. Н.И. Баклашова. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
5. Кузьмин М.П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1974. – 416 с., с ил.
6. Козлов Э.С., Сергеев Н.П., Николаев Н.С. Автоматизация процессов решения краевых задач с помощью АЦВМ. – М.: Энергия, 1974. – 111 с.
7. Liebmann G.A. A new electrical analog method for the solution of transient heat-conduction problems // Transaction of the ASME. – 1956. – v.78 №3. – P. 655–665.
8. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.

References (transliterated)

1. Saltavec V.I., Nikolaenko V.E. Metodika resheniya obratnoj zadachi teploprovodnosti / VNIIS Gosstroya SSSR No 3570-83 // Ref. zhurnal VNIIS. Seriya 01. – 1983. – vyp. 3
2. Sperrou K. Kharakteristiki polykh steklyannykh sharikov mikroskopicheskikh razmerov, materiala i neprozrachnoj dobavki k drugim teploizolyaciyam // Teploperedacha. – 1976. – No 2. – P. 91–99.
3. Kozdoba L.A., Krukovskij P.G. Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosa. – Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 360 p.
4. Naturnyj eksperiment: Informacionnoe obespechenie eksperimentalnykh issledovanij / A.N. Solodikhin, V.A. Solodovnikov i dr.; pod red. N.I. Baklashova. – Moscow: Radio i svyaz', 1982. – 304 p.
5. Kuz'min M.P. Elektricheskoe modelirovanie nestacionarnykh proცessov teploobmena. – Moscow: Energiya, 1974. – 416 p., s il.
6. Kozlov E'.S., Sergeev N.P., Nikolaev N.S. Avtomatizaciya proცessov resheniya kraevykh zadach s pomoshh'yu ACVM. – Moscow: Energiya, 1974. – 111 p.
7. Liebmann G.A. A new electrical analog method for the solution of transient heat-conduction problems // Transaction of the ASME. – 1956. – v.78 No3. – P. 655–665.
8. Butkovskij A.G. Metody upravleniya sistemami s raspredelyonnymi parametrami. – Moscow: Nauka, 1975. – 568 p.

Надійшла (received) 20.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тришевський Олег Ігорович (Тришевский Олег Игоревич, Trishevskiy Oleg Igorevich) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Технологія матеріалів», Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: 3shev@ukr.net

Салтавець Микола Вільямович (Салтавец Николай Вильямович, Saltavets Nikolay Viljamovich) – інженер кафедри «Технологія матеріалів», Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: techmat@ukr.net

Воробйов Дмитро Сергійович (Воробъёв Дмитрий Сергеевич) – студент, Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: techmat@ukr.net